

с механическими преимуществами твердотельных лазерных сред. Так, например, твердотельные матрицы обладают существенно меньшим температурным коэффициентом преломления, а следовательно, и лучшими термооптическими характеристиками. В качестве матриц в которые вводят органические красители обычно используются либо полимерные матрицы, либо матрицы на основе микропористого стекла.

В работах [58, 108, 137] были исследованы лазеры, построенные на базе активных элементов, изготовленные из пластин пористого стекла, в порах которого находился раствор родомина 6Ж в этаноле.

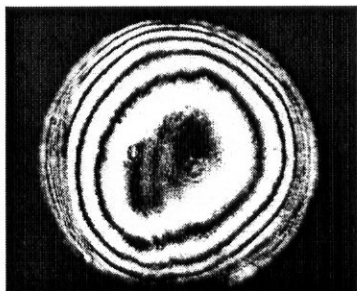
В качестве матриц использовались пористые стекла, изготовленные из промышленного стекла ДВ-1М. Заготовки подвергались полному выщелачиванию в 3N HCl при температуре  $(323 \pm 1)$  К. Далее пористые образцы промывались в дистиллированной воде, сушились при 400 К в течение 2-х часов и проходили отжиг при температуре не менее 820 К в течение 40 минут.

Введение красителя в пористые стекла осуществлялось посредством адсорбции из растворов красителей, после чего растворитель удалялся путем сушки образцов в термостате. твердотельно-жидкостной активный элемент (ТЖАЭ) представлял собой металлическую цилиндрическую кювету, внутрь которой помещались две пластины из пористого стекла с красителем. Пластины имели вид дисков диаметром 45 мм и толщиной 5 мм каждый. Торцевые поверхности кювет имели окна из стекла К8 со световым диаметром 35 мм. После сборки ТЖАЭ заполнялся этанольным раствором красителя через специальное отверстие, которое затем герметизировалось.

Ниже представлены результаты исследований твердотельно-жидкостных активных элементов (ТЖАЭ). В элементе использовался родомин 6Ж, концентрацию которого варьировали в пределах  $1 \dots 5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Оптическое качество активных элементов изучалось при помощи интерференционным способом. На типичной интерферограмме ТЖАЭ, представленной на рис. 22, видно, что на световом диаметре  $\sim 20$  мм на  $\lambda = 632,8$  нм оптические искажения составляют  $-0,1$  полосы.

*Рис. 22.  
Интерферограмма твердотельно-жидкостного активного элемента (изображение получено на световом диаметре 35 мм)*



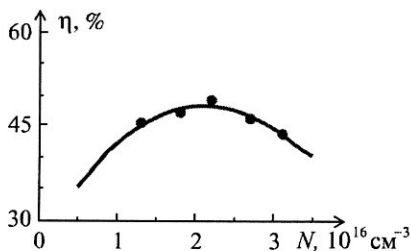


Рис. 23. Зависимости коэффициента преобразования излучения накачки  $\eta$  (по энергии) для ЛПЧ с ТЖАЭ от концентрации. Величина  $\epsilon_H$   $(2,0 \pm 0,2) \text{ Дж/см}^2$

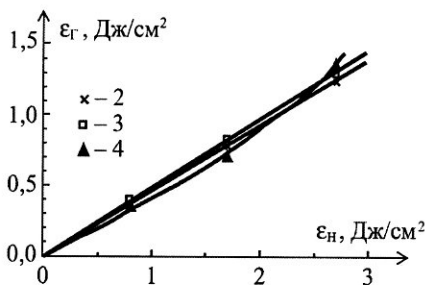


Рис. 24. Зависимости величины  $\epsilon_G$  ЛПЧ (с плоским резонатором) с ТЖАЭ от величины  $\epsilon_H$ . Концентрация растворов красителя в ТЖАЭ: 2)  $1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , 3)  $2,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 4)  $2,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Изучались характеристики лазерного преобразователя частоты (ЛПЧ): коэффициент преобразования энергии накачки  $\eta$ , расходимость  $\alpha$  и яркость  $\beta$  излучения. Типичные зависимости коэффициента преобразования ЛПЧ  $\eta$  от концентрации красителя  $N$  представлены на рис. 23. Из него видно, что зависимость  $\eta = f(N)$  имеет немонотонный вид с максимумом при  $N = (2,0 \pm 0,5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Типичные зависимости плотности энергии генерации  $\epsilon_G$  от плотности энергии накачки  $\epsilon_H$  ЛПЧ с активными элементами (АЭ), в которых концентрация красителя была близка к оптимальной, приведены на рис. 24. Из рисунка видно, что численное значение  $\eta$  для ЛПЧ с ТЖАЭ достаточно высоко  $\approx 45\%$  и близко к его значению с ЖАЭ  $\approx 55\%$  (апертура излучения накачки на образце – 10 мм).

При увеличении апертуры накачки до 20 мм при тех же плотностях энергии накачки наблюдалось снижение значений  $\eta$  ЛПЧ с ТЖАЭ до 35...40%. Значения  $\eta$  ЛПЧ для оптимальных концентраций красителя при работе в режиме одиночных импульсов представлены в табл. 13.

При работе ЛПЧ в периодическом режиме с частотами  $f$  равными 0,1 и 0,2 Гц коэффициент преобразования  $\eta$  ТЖАЭ практически остается постоянным как для плоского, так и для телескопического резонаторов.

Таблица 13

Значения коэффициента преобразования  $\eta$  (%) для ЛПЧ с различными резонаторами и активными элементами

Тип резонатора	ТЖАЭ
Плоский	$45 \pm 5$
Телескопический	$42 \pm 5$

Примечание: Приведенные значения соответствуют апертуре 10 мм и энергии накачки  $(2,0 \pm 0,2) \text{ Дж}$ .

В случае же растворов за серию из 10 импульсов величина  $\eta$  уменьшается примерно на 10 %. Результаты измерений расходимости  $\alpha$  ЛПЧ в одиночном и периодическом режимах ( $f=0,1$  Гц) приведены в табл. 14.

Из таблицы видно, что при работе в периодическом режиме величина  $\alpha$  в случае ТЖАЭ в плоском резонаторе сохраняется такой же, как и в одиночном режиме (5 угл. минут на уровне половины интенсивности).

Таблица 14

Значения расходимости  $\alpha$  в режиме одиночных импульсов ( $\alpha$  – в угловых минутах; в скобках  $\alpha \cdot 10^3$  – в радианах) для ЛПЧ

Тип резонатора	ТЖАЭ
Плоский	45±5 (1,5±0,2)
Телескопический	42±5 (0,40±0,06)

Типичный спектр генерации ЛПЧ с ТЖАЭ представлен на рис. 25 и характеризуется шириной 6 нм по уровню 0,1 с максимумом  $\lambda_m^r = (561 \pm 1)$  нм. Проведенные климатические испытания показали, что ТЖАЭ сохраняют хорошее оптическое качество в диапазоне температур от 223 до 323 К.

В работах [118, 137] проведены исследования лазеров с твердотельными активными элементами.

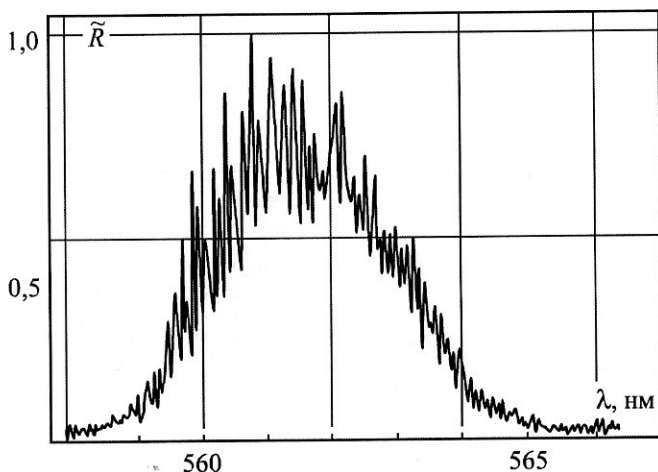
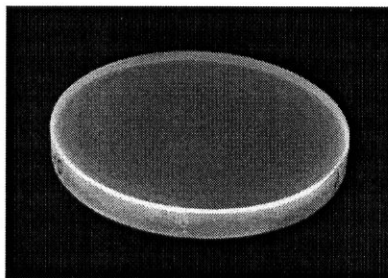


Рис. 25. Спектр генерации преобразователя частоты с плоским резонатором с твердотельно-жидкостным активным элементом (здесь  $\tilde{R}$  – относительная плотность почернения фотопленки)



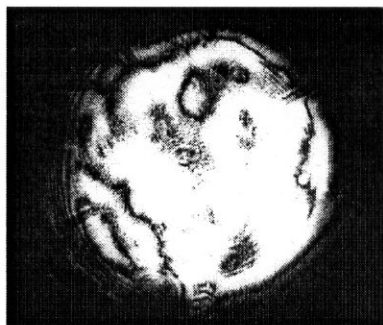
*Рис. 26. Внешний вид твердотельного активного элемента (диаметр 45 мм, толщина 5 мм)*

Результаты исследования генерационных характеристик лазерного преобразователя частоты (ЛПЧ) с твердотельным активным элементом (ТАЭ) были получены на образцах, активированных родамином 6Ж. Исследовались ТАЭ, оптические плотности которых составляли величину  $\sim 5,0$  (серии образцов №№ 1 и 2),  $\sim 3,8$  (№№ 3 и 4) и  $\sim 3,0$  (№ 5). Для сравнения использовался жидкостной активный элемент (ЖАЭ), в виде кюветы из стекла К8 с этанольным раствором красителя (толщиной 5 и световым диаметром 50 мм). Оптическая плотность раствора  $D=4,3$ . Внешний вид ТАЭ представлен на рис. 26. Типичные интерферограммы ТАЭ изображены на рис. 27.

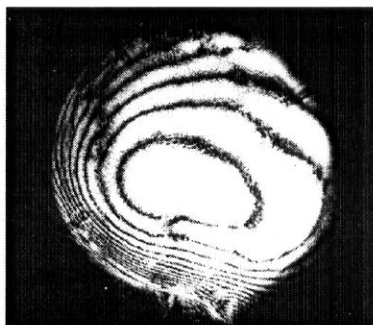
Исследовались зависимости коэффициента преобразования излучения накачки  $\eta$  от плотности энергии накачки  $\epsilon_H$  при различных диаметрах излучения накачки. Типичные зависимости  $\eta(\epsilon_H)$  приведены на рис. 28, на котором для сравнения представлены и аналогичные данные по раствору. Значения  $\eta$  для других образцов приведены в табл. 15.

Из сопоставления зависимостей, изображенных на рис. 24 и 28, видно, что в этих случаях наблюдается разный характер приведенных кривых. Если на первом из них величина  $\eta$  практически не зависит от плотности энергии накачки, то во втором случае зависимость наблюдается. По нашему мнению, это обусловлено следующими причинами. Во втором случае соотношение апертуры пучка накачки  $d$  и толщины образца  $l$  находится в более невыгодном положении  $d/l \sim 1,4$ , что способствует проявлению суперлюминесценции.

Об этом свидетельствует и уменьшение величины  $\eta$  при увеличении  $d$  и соответственно отношения  $d/l$ . В первом же случае условия эксперимента более благоприятны  $d/l \leq 1$ , и при этом влияние суперлюминесценции оказывалось существенно меньше. Таким образом, очевидно, что для снижения влияния суперлюминесценции в ТАЭ необходимо оптимизировать величину отношения  $d/l$  за счет увеличения толщины активного элемента. Поэтому задача создания ТАЭ



а)



б)

Рис. 27. Интерферограммы твердотельных активных элементов – серия №1 (а) и №5 (б). Изображения получены на световом диаметре 40 мм.

Таблица 15

Значения коэффициента преобразования  $\eta$  (%) для различных ТАЭ

$\epsilon_H, \text{Дж/см}^2$	Серия ТАЭ				
	1	2	3	4	5
1,0	$30 \pm 3$	$28 \pm 3$	$40 \pm 4$	$35 \pm 3$	$28 \pm 3$
3,3	$30 \pm 3$	$25 \pm 3$	$35 \pm 4$	$28 \pm 3$	$16 \pm 3$

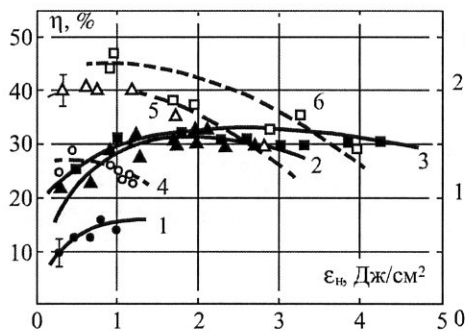


Рис. 28. Зависимости коэффициента преобразования  $\eta$  ЛПЧ с плоским резонатором от плотности энергии накачки для ТАЭ (1–3 – темные значки; серия образцов №1) и ЖАЭ (4–6 – светлые значки). Апертура накачки (в мм): 1, 4 – 19; 2, 5 – 12 и 3, 6 – 7

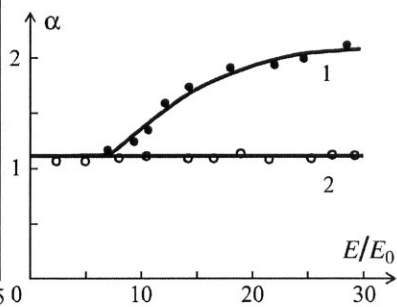


Рис. 29. Связь между угловой шириной излучения  $\alpha$  и относительной энергией накачки  $E/E_0$  ЛПЧ с недисперсионным резонатором в частотном режиме ( $E_0$  – пороговая энергия накачки). В качестве активной среды: 1 – ЖАЭ; 2 – ТАЭ

с толщинами более 5 мм является актуальной, но довольно трудной технологической задачей.

Также исследовались и пространственные характеристики генерации. Величина расходимости  $\alpha$  зависела от апертуры накачки: для серии № 3, например,  $\alpha$  равнялась 1,2 и 2,3 угловым минутам при апертурах накачки 7 и 17 мм соответственно.

Значения  $\alpha$  этого ТАЭ в пределах точности эксперимента совпадают с полученными значениями  $\alpha$  для ЖАЭ. Значения  $\alpha$  для других образцов приведены в табл. 16. Так как в большинстве случаев генерируемое излучение в поперечном сечении представляло эллипс, то расходимость  $\alpha$  характеризуется в таблице двумя значениями (по двум осям эллипса).

Изучение однородности АЭ показало, что они обладают различным оптическим качеством, которое можно характеризовать числом интерференционных полос, которые приведены на рис. 27. В случае серии № 5 наблюдается большое число полос нерегулярной структуры, что свидетельствует о его невысоком оптическом качестве: вариация показателя преломления  $\Delta n$  превышает величину  $\sim 10^{-3}$ , так как сдвиг на одну интерференционную полосу для образцов с толщиной 5 мм соответствует вариации  $\Delta n \approx 10^{-4}$ . В случае другого образца полосы отсутствуют (за исключением периферийной зоны, которая не используется для работы АЭ), и вариация  $\Delta n$  не превышает величины  $10^{-5}$ . Как видно из табл. 15 и 16 полученные значения генерационных характеристик АЭ коррелируют с их оптическим качеством.

На рис. 29 приведены зависимости расходимости  $\alpha$  от относительной энергии накачки  $E/E_0$  ЛПЧ с недисперсионным резонатором ( $E_0$  – пороговая энергия накачки) в частотном режиме с частотой 0,2 Гц. Из него видно, что в этом режиме работы лазерного преобразователя величина  $\alpha$  в случае ТАЭ не меняется, тогда как в случае ЖАЭ – возрастает приблизительно в 2 раза. Для ТАЭ было замечено увеличение расходимости генерации примерно на 30 % только за серию

Таблица 16

Значения  $\alpha$  (угловые минуты, в скобках  $\alpha \cdot 10^4$  – в радианах) для ТАЭ и ЖАЭ при апертуре накачки 7 мм

ЖАЭ	Серия ТАЭ				
	1	2	3	4	5
1,2×1	1,6×2	3,1×1	1,2×1	1,6×3	2,7×2
2	4	3	2	2	7
(3,6×3,6)	(4,8×7,2)	(9,3×3,9)	(3,6×3,6)	(4,8×9,6)	(8,1×8,1)

из 100 импульсов. Кроме того, измерения показали, что за серию из 100 импульсов коэффициент преобразования остается постоянным, тогда как для ЖАЭ — уменьшается примерно на 50 %.

Типичные спектры генерации ЛПЧ при разной концентрации Р6Ж в активном элементе представлены на рис. 30. Они характеризуются шириной 3,5 нм на уровне 0,1. Кроме того, заметим, что наблюдается bathochromный сдвиг положения максимума полосы генерации  $\lambda_m^r$  от концентрации красителя  $N$ . Так, например, при изменении  $N$  в диапазоне  $3,6 \dots 6,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  величина  $\lambda_m^r$  меняется от 551 до 559 нм, что качественно совпадает с характером концентрационных зависимостей положения максимума полосы флуоресценции импрегнированных пористых стекол.

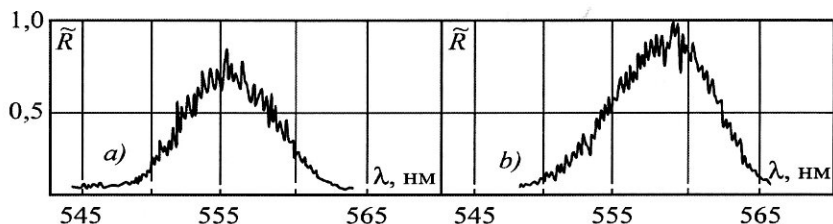


Рис. 30. Спектры генерации лазерного преобразователя частоты с твердотельным активным элементом — серия №4 (а) и серия №2 (б).  
 $\tilde{R}$  — относительная плотность почернения фотопленки

Лучевая прочность ТАЭ оказалась равной  $(7 \pm 1) \text{ Дж/см}^2$ , что значительно выше, чем для большинства полимерных материалов. Проведенные климатические испытания показали, что вариация температуры от 200 до 400 К не приводит к ухудшению оптического качества и работоспособности ТАЭ.

В работе [270] проведено исследование компактного импульсно-периодического лазера с твердотельным элементом на основе пористого стекла с введенным в объем красителем и полимерной иммерсией.

Была выполнена разработка твердотельного активного элемента для компактного перестраиваемого лазера на красителе. Накачка лазера на красителе осуществлялась компактным неодимовым лазером с удвоением частоты. Излучение лазера накачки характеризовалось следующими параметрами:  $\lambda = 530 \text{ нм}$ ; энергия импульса излучения накачки — 15 мДж; длительность импульса — 5 нс; диаметр излучения — 8 мм; частота повторения импульсов —  $0,1 \dots 0,3 \text{ Гц}$ ; расходимость излучения —  $0,001 \text{ рад}$ .

Оптическая схема перестраиваемого лазера на красителе приведена на рис. 31. Основной пучок излучения лазера накачки I был

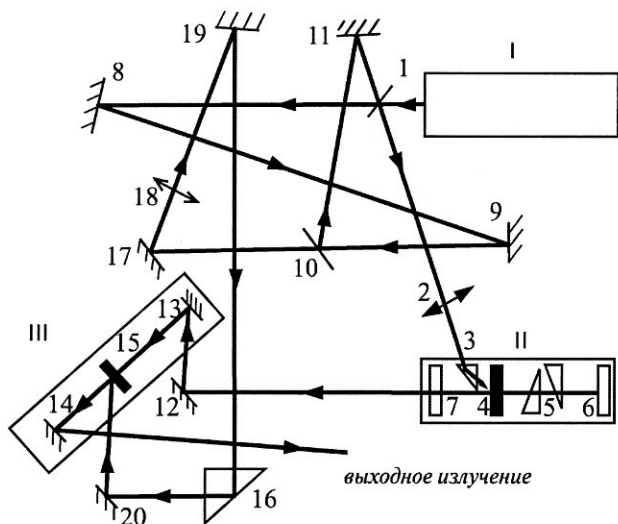


Рис. 31. Схема перестраиваемого лазера на красителе:

*I* – лазер накачки; *II* – формирующий генератор; *III* – усилитель;  
 1, 10 – светоделительные пластинки, 2, 18 – линзы, 3, 16 – поворотные призмы,  
 4, 15 – активные элементы, 5 – линейный телескоп, 6 – дифракционная решетка,  
 7 – выходное зеркало ( $\rho=20\%$ ), 8, 9, 11–14, 17, 19, 20 – зеркала

направлен через поворотную призму (3) на активный элемент (АЭ) (4) (концентрация красителя  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , толщина – 5 мм, угол между осями луча накачки и резонатора  $\sim 6^\circ$ ). Диаметр лазерного пучка накачки на активном элементе был равен приблизительно 100 мкм. Резонатор формирующего генератора включает дифракционную решетку (6) (1200 штр/мм), работающую в автоколлимационном режиме, и выходное зеркало с коэффициентом отражения 20%. Внутри резонатора помещен линейный телескоп для расширения пучка с минимальной дисперсией. База резонатора равна 12 см.

Для увеличения коэффициента усиления используется схема удлинения импульса накачки. Для этого  $\sim 8\%$  излучения накачки, отраженного светоделительной пластинкой (1), через линзу (2) и поворотную призму (3) попадает на АЭ (4). Дополнительно часть излучения накачки ( $\sim 20\%$ ) падает на АЭ после отражения сигнала от зеркал (8), (9), (11) и светоделительной пластинки (10). Эта схема обеспечивает задержку импульса приблизительно на 3 нс, поэтому длительность импульса на АЭ достигает  $\sim 8$  нс. Такая длительность обеспечивает на базе резонатора 12 см многопроходный режим генерации (не менее 10 проходов). Импульс генерации усиливается усилителем *III*, состоящем из АЭ (15),



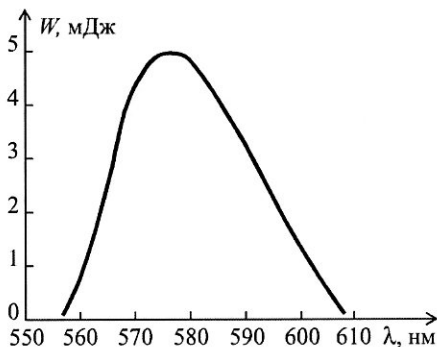


Рис. 32. Перестроечная кривая лазера на красителе

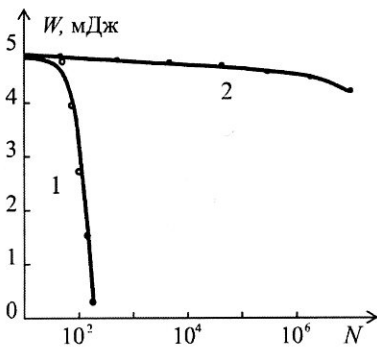


Рис. 33. Зависимости энергии генерации лазера на красителе  $W$  от числа вспышек  $N$

помещенного в резонатор (зеркала (13) и (14)). Возбуждение АЭ обеспечивается импульсом накачки лазера I с соответствующей начальной задержкой, которая обеспечивается отражением луча от зеркал (8), (9), (17), (19), (20) и поворотной призмой (16).

Кривая перестройки излучения изображена на рис. 32. Диапазон перестройки длины волны генерации  $\lambda$  лежит в пределах  $\lambda = 557 \dots 607$  нм с максимумом  $\lambda = 575$  нм. Полуширина этой кривой равнялась 30 нм, что близко к полуширине полосы флуоресценции родамина 6Ж в ПС. Спектральная ширина излучения генерации была  $\Delta\nu = 7 \text{ см}^{-1}$  (приблизительно 0,2 нм).

На рис. 33 представлены зависимости энергии генерации от числа импульсов. Видно, что после 100 вспышек происходит резкая деградация излучения за счет фотообесцвечивания АЭ (кривая 1). В настоящей конструкции предусмотрено смещение АЭ в направлении перпендикулярном оси резонатора. При этом срок службы одного АЭ может быть продлен в  $(D/d)^2$  раза, где  $D$  — диаметр АЭ,  $d$  — диаметр излучения накачки. Так, например, при  $D = 45$  мм и  $d = 10$  мкм общее число вспышек более  $10^7$  без значительного уменьшения энергии генерации.

Как отмечалось выше, в качестве матриц, в которые вводят органические красители, используются не только матрицы на основе микропористого стекла, но и полимерные матрицы.

В работе [25] в качестве матриц для введения красителей использовались перхлорвиниловая основа (ПХВ), диацетат целлюлозы (ДАЦ) и триацетат целлюлозы (ТАЦ). Для использования в ближнем ИК спектральном диапазоне из этих матриц наиболее подходящей является ПХВ основа, поскольку сама матрица обладает меньшими потерями, особенно в диапазоне 1,3 и 1,55 мкм — биологически безо-

пасном диапазоне. Красители, внедряемые в матрицы в этой работе, были полиметиновые красители 3955 и 2681. Накачку этих красителей можно осуществлять излучением YAG-Nd лазера и получать генерацию в диапазоне 1,1–1,25 мкм. Выбором сочетания матрицы и красителя можно варьировать квантовую эффективность, длину волны максимума генерации, ширину спектра.

Для лазеров на красителях довольно остро стоит проблема деградация красителя под действием излучения накачки. Но, выбирая конфигурацию лазерной системы, схему накачки, можно увеличить ресурс работы лазера [94]. Авторы исследовали скорость фоторазложения красителя родамин 6Ж в полиметилметакрилате. Накачка осуществлялась второй гармоникой импульсного YAG-Nd лазера (532 нм). Как показали исследования, при снижении интенсивности накачки менее некоторого порогового значения (в данном случае 0,15 МВт/см<sup>2</sup>) практически не происходит фоторазложения красителя, а также достигается наибольший ресурс работы активного элемента. Коэффициент преобразования накачки за  $1,2 \cdot 10^5$  импульсов снизился менее чем на 1 %, оставаясь довольно высоким порядка 30 %.

С помощью лазеров на красителях в полимерных матрицах возможно получение пикосекундных лазерных импульсов [26]. Авторы использовали красители 2681 и 3493 в перхлорвиниловой смоле. Максимальный достигнутый коэффициент преобразования накачки по энергии составил 3 %. Изменением концентрации красителя авторы осуществляли перестройку максимум длины волны генерации (1,245–1,44 мкм). При этом длительность импульса, соответствовала длительности импульса накачки – 32 пс (для активной среды длиной 6 мм).

Полимерные красители могут вводиться не только в органическую матрицу, но и в неорганическую – такой матрицей служит микропористое кварцевое стекло (МКС). Такое стекло близко по своим механическим свойствам к оптическим стеклам. Но при этом ресурс работы такого активного элемента не превышает  $10^2$ – $10^3$  импульсов [40]. В отличие от МКС полимерные матрицы с оптимальным сочетанием полимер-краситель обладают ресурсом на 1–2 порядка больше, но при этом механические и термооптические характеристики хуже.

Кроме того, полимерным матрицам свойственны краевые эффекты, ухудшающие оптическую однородность. Совмещение нужных параметров можно получить внедрением в МКС окрашенного олигомера с его последующим отверждением [40].

Авторы использовали эпоксиполимер на основе диглицидового эфира камфорной кислоты и метилгексагидрофталевого ангидрида. Спектр генерации лазера, созданного на основе такого активного элемента – МКС с эпоксиполимером, активированным родамином

С, лежал в диапазоне 607–655 нм при КПД – 20 %. Ресурс работы достигал  $10^4$  импульсов.

Существенно больший ресурс был достигнут в работе [205]. Авторы так же использовали МКС, заполненное полимером, активированного красителем. Были исследованы матрицы с красителями пиррометен (Pyrromethene) 580, 597, 650 и родамином 11Б. Максимально достигнутая эффективность преобразования энергии накачки была достигнута для пиррометена 597 – 70 %, при ресурсе 60000 импульсов при интенсивности накачки  $25 \text{ МВт/см}^2$  и 45000 импульсов при  $\text{МВт/см}^2$ . Наибольший ресурс работы был достигнут для родамина 11Б – 100000 импульсов, но при более низкой эффективности порядка 50 %. Размер тестируемого активного элемента составлял  $20 \times 14 \times 4 \text{ мм}$ .

В работе [288] были исследованы лазеры на основе красителей родамин 700, 800 и Oxazine 725 в полимерной матрице, матрице из пористого кварцевого стекла и органически модифицированного кварца (*organically modified silicate*) (ОМК). Наибольшая эффективность преобразования энергии накачки была у Oxazine 725 в полимерной матрице – 43 % (длина волны 690 нм), наибольшая длина волны была у родамина 800 в МКС – 797 нм, эффективность составила 21 %.

Генерация в видимом диапазоне была получена в лазерах на основе полимерных матриц активированных родамином Б и родамином 6Ж [219]. Накачка осуществлялась второй гармоникой YAG-Nd лазера с модуляцией добротности. Максимум генерации для активного элемента с родамином Б приходился на 594 нм, спектр генерации 585–604 нм, КПД 25 %, для родамина 6Ж соответственно длина волны – 566 нм, спектр 556–575 нм, КПД – 35 %.

Лазерные импульсы короче 500 пс были получены в лазере на основе красителя в эпоксиполимерной матрице при накачке второй гармоникой YAG:Nd лазера с длительностью импульса 14 нс [229]. Измеренная величина температурной отстройки рабочей длины волны составила  $2,3 \cdot 10^{-2} \text{ нм/К}$ .

Активный элемент в виде пленки из *polyvinil alcohol* [247], активированной красителем coumarine 460, нанесенной на прозрачную стеклянную подложку позволяет получать до 11 % КПД, на длине волны от 454 до 458 нм, в зависимости от концентрации красителя, при этом выходная энергия такого лазера достигает 100 мкДж.

В работе [266] описан лазер на красителе с ламповой накачкой в пластмассовой матрице Agilase Inc., имеющий пластинную конфигурацию (см. рис. 34). Длительность выходного импульса составила 1,5 мкс, энергия в импульсе – 400 мДж, эффективность – 37 % (см. рис. 35). В дальнейшем планировалось увеличить выходную энергию до 1 Дж.

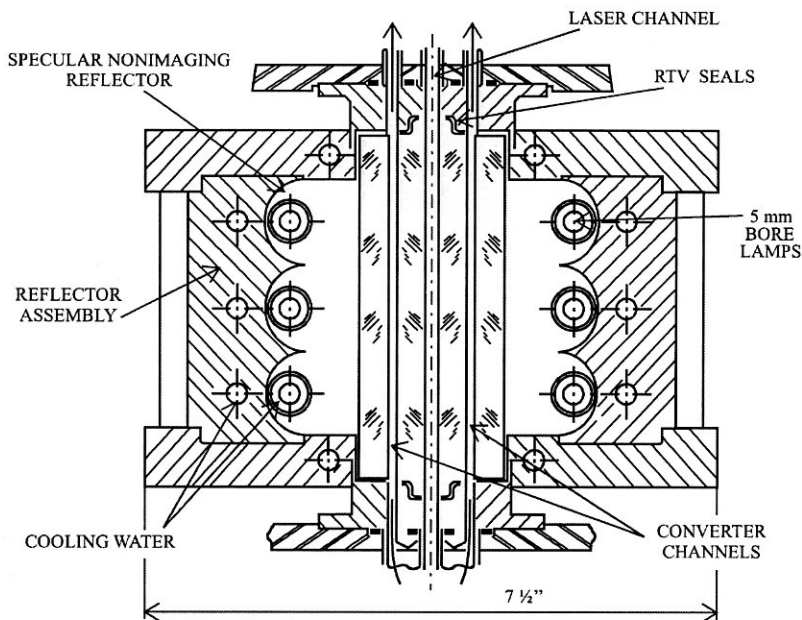


Рис. 34. Конструкция лазера на красителе, введенном в пластмассу Agilase Inc с ламповой накачкой

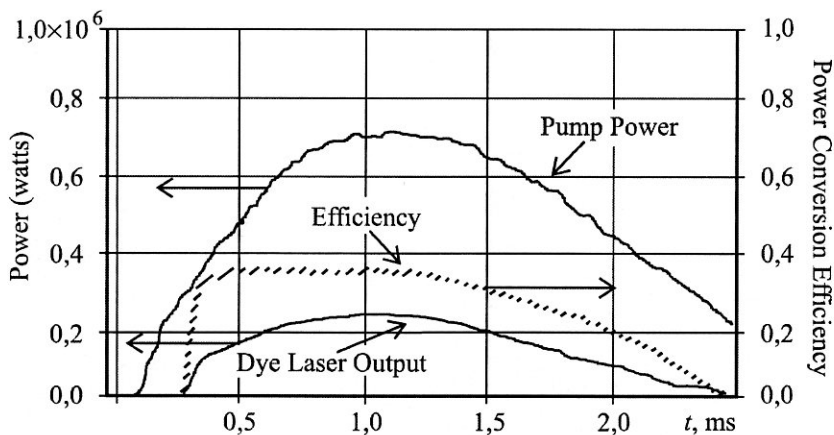


Рис. 35. Эффективность лазера на красителе, введенном в пластмассу Agilase Inc с ламповой накачкой

В последнее время лазерные элементы на красителях в полимерной матрице, выполненные по *sol-gel* технологии, получили широкое распространение. Эта технология позволяет получать элементы различной формы – от стержня до волновода [284]. КПД лазеров на основе таких сред достигает 70 %.

# ГЛАВА 5. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ НА КРАСИТЕЛЯХ

## 5.1 ЛАЗЕРЫ НАКАЧКИ

Из огромного разнообразия твердотельных и газовых импульсных лазеров наиболее часто используются для накачки ЛК лазеры следующих типов: лазеры на АИГ, азотные и эксимерные. Особенно азотного лазера является простота его производства и эксплуатации при низкой стоимости. Именно это качество является причиной долголетнего и стабильного спроса на азотные лазеры, в том числе для накачки ЛК.

В то же время по энергетическим характеристикам излучения ( $P_{\text{имп}} < 10^6$  Вт,  $P_{\text{ср}} < 1$  Вт,  $E_{\text{имп}} < 10^{-2}$  Дж) азотный лазер на порядок уступает лазерам на эксимерных молекулах и АИГ. Поэтому при создании мощных перестраиваемых лазеров основная конкуренция происходит между двумя последними типами источников накачки.

Преимуществом эксимерного лазера является выбор в широких пределах длины волны излучения. При этом УФ-излучение накачки ЛК (например,  $\lambda_n = 308$  нм лазера на ХеС1 или  $\lambda_n = 248$  нм лазера на КгF) позволяет получать перестраиваемое излучение в широком диапазоне спектра — от УФ до ближнего ИК ( $\lambda_{\text{ГМАХ}} \approx 1$  мкм), так как практически все красители имеют полосы поглощения в УФ-области спектра.

С другой стороны, применение в эксимерных лазерах таких газов, как хлор и фтор, создает известные проблемы при эксплуатации. Отрицательными факторами являются также высокий уровень электромагнитных помех, вызываемых мощным импульсным разрядом при возбуждении эксимерных сред, и низкая фотохимическая стабильность органических красителей под действием УФ-излучения.

При накачке ЛК коротковолновым излучением лазеров на КгF ( $\lambda_n = 248$  нм) диапазон генерации перестраиваемого лазера начинает-

ся с  $\lambda_T < 300$  нм, но при этом активная среда ЛК быстро деградирует. Поэтому оптимальным по совокупности параметров считается для накачки ЛК лазер на эксимерных молекулах ХеСl, а расширение диапазона перестраиваемого излучения в УФ-область спектра осуществляют с помощью нелинейно-оптического преобразования в кристаллах. Наиболее используемый кристалл KDP (DKDP) позволяет достичь  $\lambda_{\text{УФ}} > 257$  нм.

При создании коммерческих моделей ЛК используют накачку излучением второй либо третьей гармоники лазера на АИГ ( $\lambda_H = 532$  нм, 355 нм). Накачка третьей гармоникой имеет те же достоинства и недостатки, что и накачка излучением эксимерных лазеров: широкий диапазон длин волн генерации при низкой фотостабильности активных сред. При этом лазер на АИГ невыгодно отличается от эксимерного функциональной сложностью (двойное преобразование частоты во вторую, а затем в третью гармонику).

При накачке ЛК второй гармоникой излучения лазера на АИГ проблема фотостабильности существенно снижается. Кроме того, из-за уменьшения стоксова сдвига частоты возрастает эффективность преобразования энергии накачки, достигая для различных красителей 20...40 %. При продольном способе накачки генератора или усилителя на красителях осесимметричное распределение интенсивности излучения лазера на АИГ обеспечивает высокое качество пространственной структуры перестраиваемого излучения, что повышает эффективность нелинейного преобразования частоты в УФ-область спектра.

Оценивая в целом преимущества и недостатки эксимерных и твердотельных лазеров, трудно дать на ближайшие годы однозначный прогноз приоритета тех или иных из них, особенно с появлением новых, высокоэффективных твердотельных сред, таких как галлий-скандий-гадолиниевый гранат и др. Сегодня фирмы, производящие лазеры, предусматривают в своих ЛК возможность накачки от различных источников когерентного излучения, добиваясь универсальности применения ЛК за счет увеличения набора сменных оптических элементов.

## 5.2 ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ЛАЗЕР ЛЖИ-501

Основным звеном, которое задает требования к остальным узлам и элементам, является дисперсионный резонатор. Именно выбор схемы и элементной базы дисперсионного резонатора определяет требуемые для эффективной генерации значения длительности и мощности импульсов излучения накачки, устанавливает предельную мощность

одномодового излучения генератора и соответственно число усиленных каскадов для достижения заданных энергетических характеристик выходного излучения ЛК. Требования к качеству обработки оптических и прецизионных механических деталей перестраиваемого лазера, к структуре и параметрам автоматизированной системе управления лазером также во многом определяются выбором дисперсионных элементов и оптической схемы резонатора ЛК.

На примере отечественного перестраиваемого лазера ЛЖИ-501 проанализируем особенности применения комбинированной внутриврезонаторной дисперсионной системы, включающей призмы, линзовый телескоп, ЭФП в резонаторе с квазипродольным способом накачки.

Перестраиваемый лазер состоит из лазера накачки на АИГ с удвоением частоты (ИЗ-35) с преобразователями частоты излучения в УФ-диапазон спектра. Лазер накачки ЛТИ-401 работает в режиме электрооптической модуляции добротности с частотой следования импульсов до 50 Гц, энергия импульсов излучения 0,2 Дж на длине волны 1064 нм и около 20 мДж на второй гармонике ( $\lambda_n = 532$  нм). Основной режим генерации – многомодовый. Для осуществления одномодовой генерации в комплект лазера входит набор сменных узлов, однако при переходе к одномодовому режиму энергия импульсов излучения существенно уменьшается.

В качестве дисперсионных элементов в лазере ЛЖИ-501 выбраны призмы. В отличие от дифракционной решетки, призма в видимом диапазоне спектра обладает малой угловой дисперсией, поэтому для достижения ширины линии генерации  $\delta\lambda_r \sim 0,01$  нм (типичное значение для «классических» схем ЛК типа схемы Хэнша [248]) в резонатор ЛЖИ-501 пришлось ввести четыре дисперсионные призмы из стекла ТФ-5 и дополнительно к ним 4-кратный линзовый телескоп Галилея с широкополосным просветлением и ЭФП.

Эталон с базой  $d = 1$  мм при коэффициентах отражения широкополосных покрытий  $R = 78$  % реально имеет резкость  $F \approx 10$  и при установке в коллимированном пучке за телескопом обеспечивает сужение ширины линии генерации на порядок (от 0,05...0,1 до 0,005...0,01 нм). Прецизионная подстройка длины волны генерации ЛК осуществляется поворотом ЭФП.

Перестройка  $\lambda_r$  в широких пределах осуществляется в ЛЖИ-501 поворотом призмы, ближайшей к телескопу. Такой способ обеспечивает более плавную перестройку длины волны, чем поворот зеркала резонатора. Суммарные оптические потери всех элементов в резонаторе ЛЖИ-501 не превышают 10...20 %, то есть примерно вдвое ниже, чем при использовании обычной дифракционной решетки.



Применение комбинированной дисперсионной системы из четырех призм, телескопа и эталона привело к увеличению оптической длины резонатора ЛЖИ-501 до  $L_p \approx 50$  см. Известно, что увеличение оптической длины резонатора — один из существенных факторов снижения эффективности генерации импульсного ЛК, особенно на краях диапазона перестройки. Это обстоятельство потребовало создания специализированного лазера на АИГ (ЛТИ-401) с оптической длиной резонатора около 1 м.

В результате увеличения длительности импульса накачки до 20 нс увеличилось число обходов резонатора за время длительности накачки. Последнее позволило расширить диапазон перестройки. Использование набора красителей (родамин 6Ж, родамин С, Ф160, оксазин 1) позволяет осуществлять плавную перестройку длины волны генерации в диапазоне 550–750 нм. Использование нелинейно-оптического преобразования частоты ЛК на основе кристалла KDP (генерация второй гармоники, генерация суммарных частот) сдвигает область перестройки в диапазон 210–450 нм.

## 5.3 ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ЛАЗЕРЫ СЕРИИ ВЛ

Лазеры серии ВЛ построены по схеме генератор — усилитель и оптимизированы для накачки мощным УФ-излучением эксимерного лазера (XeCl лазер типа ЭЛИ:  $E_H \approx 100 \dots 150$  мДж). Известно [231], что при УФ-накачке оптимальным является поперечный способ накачки в ЛК, который для лазеров типа ВЛ удобен еще и тем, что излучение эксимерного лазера имеет пучок в виде вытянутого прямоугольника в поперечном сечении.

Основной дисперсионный элемент в резонаторе лазеров серии ВЛ — дифракционная решетка, установленная в автоколлимационном режиме. В модели ВЛ-4 она имеет 1200 штрих/1 мм и работает в первом порядке дифракции, в модели ВЛ-18 — 600 штрих/1 мм и работает в высоких (3...8) порядках дифракции.

При больших углах падения излучения дифракционная решетка имеет высокую угловую дисперсию и обеспечивает малую ширину линии, высокую точность перестройки длины волны излучения. Поэтому дисперсионный резонатор на основе дифракционной решетки используется не только в лазерах серии ВЛ, но с различными модификациями в большинстве современных коммерческих моделей импульсных ЛК.

Для получения узкой линии генерации в резонаторе ЛК перед решеткой устанавливают расширитель пучка, например в классической

схеме Хэнша — линзовый ахроматизированный телескоп. В лазерах серии ВЛ используют модифицированную схему Хэнша, заменив телескоп на призмный расширитель пучка.

Преимущества призмного телескопа заключаются в простоте его изготовления, поляризующих свойствах и в том, что можно достичь расширения пучка в десять раз в оптической схеме с малой оптической длиной (единицы сантиметров). Так, в лазерах ВЛ-4 и ВЛ-10 установлен 40-кратный расширитель из четырех кварцевых призм, в модели ВЛ-18 — 100-кратный из пяти призм. Суммарное пропускание телескопа с просветленными гранями призм составляет для рабочей поляризации не менее 50%. Оптическая длина резонатора ЛК не превышает 20...25 см.

Сохраняя малую оптическую длину резонатора, можно обеспечить более чем 100-кратное расширение пучка, однако с увеличением сечения пучка существенно снижается стабильность длины волны излучения (сильнее сказываются механические нестабильности элементов резонатора).

Сканирование длины волны излучения ЛК осуществляется поворотом дифракционной решетки с помощью фазового электропривода. Синусный механизм обеспечивает линейную зависимость длины волны от количества шагов двигателя. В лазере ВЛ-18 механизм поворота решетки имеет прецизионную кварцевую направляющую и безлюфтовые передачи (используются сдвоенные подпружиненные шестерни), в результате точность перестройки во всем диапазоне углов 40...70° составляет не хуже  $\pm 5''$ . В длинах волн генерации ЛК это соответствует  $\pm 0,02$  нм в диапазоне 330...950 нм.

Дополнительным спектральным селектором в лазерах серии ВЛ, как и в большинстве импульсных ЛК, является ЭФП. В лазерах ВЛ-4, ВЛ-10 и ВЛ-18 устанавливаются монокристаллические кварцевые эталоны с базами 0,66, 2 и 5 мм соответственно. ЭФП с резкостью  $15^\circ$  обеспечивает дополнительное сужение линии генерации на порядок. В ВЛ-18  $\delta\lambda_T < 10^{-3}$  нм, что соответствует одной — двум продольным модам генерации.

В лазере ВЛ-4 точная подстройка и сканирование длины волны осуществляются поворотом эталона с помощью «ручного» привода, в ВЛ-18 использован шаговый электропривод с прецизионной оптомеханической системой установки начального положения и микропроцессорным управлением. В результате абсолютная точность настройки длины волны излучения составляет не хуже  $\pm 0,05$  нм, минимальный шаг сканирования и воспроизводимости составляют  $2 \cdot 10^{-4}$  нм (без эталона шаг и воспроизводимости  $2 \cdot 10^{-3}$  нм).

Схема генератора в модели ВЛ-18 отличается от предыдущих использованием двух идентичных дифракционных решеток, уста-

новленных под некоторым углом друг к другу на одной оси поворота. Резонатор образован одной из этих решеток и гранью оборотной стороны призмы, установленной на месте выходного зеркала генератора. На эту грань нанесено широкополосное частично отражающее покрытие.

Прошедшее через оборотную призму излучение падает на дополнительную дифракционную решетку, которая служит спектральной развязкой генератора от усилителя и значительно снижает свержлюминесцентный фон на выходе ЛК.

В лазерах ВЛ-4 и ВЛ-10 использован один усилительный каскад, в лазере ВЛ-18, рассчитанном на более высокие мощности накачки (до 10 МВт), – двухкаскадный усилитель. Доля энергии накачки генератора составляет во всех обсуждаемых моделях ЛК около 8 % от накачки первого усилителя. При невысокой (единицы процентов) эффективности преобразования накачки в генераторе использование усилителей позволяет увеличивать общий КПД лазера до 15 %. Кювета имеет длину 20 мм в генераторе и предварительном усилителе.

Во втором усилителе используется кювета длиной 40 мм, боковая грань кюветы просветлена для излучения накачки. Паразитная генерация от передних и задних (по оптической оси генератора ЛК) граней кювет устраняется с помощью широкополосного просветления этих граней и наклона кюветы на угол около  $5^\circ$  к оси резонатора. Перед оконечным усилителем в лазере ВЛ-18 установлен 2,5 кратный линзовый телескоп для согласования сечения пучка усиливаемого излучения с сечением возбужденной области красителя.

Растворы красителей прокачиваются через каждую кювету автономными помпами с герметичным приводом через магнитные муфты. Смена рабочих сред осуществляется заменой кювет вместе с помпами. Автономность системы прокачки каждой кюветы позволяет независимо оптимизировать концентрацию красителя в генераторе и в усилительных каскадах, что в некоторых случаях позволяет повышать эффективность преобразования энергии излучения накачки.

В оптических схемах ВЛ лазеров прослеживается развитие представлений разработчиков лазеров о необходимости временной задержки импульсов накачки усилителей относительно накачки генератора. Так, в модели ВЛ-4 задержка отсутствует. Это должно приводить к снижению эффективности преобразования накачки в периферийных областях диапазонов генерации красителей и к повышению широкополосного фона в излучении ЛК из-за развития одно- и особенно двухпроходовой суперлюминесценции в усилителе. В ВЛ-10 введена линия задержки длиной 90 см, в ВЛ-18 длина линии задержки уже достигает 140 см. Это обеспечивает задержку накачки усилителей

на время 5 нс, достаточное для развития генерации в большей части диапазона генерации каждого красителя.

## **5.4 ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ЛАЗЕРЫ ЛЖИ-504, ЛЖИ-507**

Промышленные лазеры ЛЖИ-504 и ЛЖИ-507 предназначены для генерации перестраиваемого узкополосного излучения с высокой частотой следования импульсов. Использование лазера на парах меди для возбуждения растворов красителей в лазере ЛЖИ-504 позволяет получать высокие значения средней мощности излучения. В ЛЖИ-507 для накачки применяется мощный азотный лазер. В обоих приборах использован модифицированный вариант оптической схемы Хэнша и поперечный способ накачки.

В приборе ЛЖИ-507 дисперсионный резонатор ЛК образован дифракционной решеткой 1200 штрих/1 мм, телескопической системой из шести призм, кюветой с красителем и выходным зеркалом, выполненным в форме клина. Излучение азотного лазера с помощью системы зеркал распределяется между генератором и усилителем в соотношении 1:3, оптимальном при мощности накачки около 600 кВт. На усилитель импульс накачки поступает с задержкой относительно генератора. Эта схема аналогична рассмотренной выше схеме лазера ВЛ-10 и является типичной для ЛК с накачкой от импульсных газовых лазеров мощностью от сотен киловатт до единиц мегаватт.

Для эффективной генерации в широком спектральном диапазоне в ЛК предусмотрена замена основных оптических элементов, один комплект которых оптимизирован для УФ-области спектра, другой для видимой и ближней инфракрасной. Так, в комплекте лазера ЛЖИ-507 имеются две дифракционные решетки с коэффициентом отражения около 80 % в первом порядке на длинах волн 450 и 600 нм, а также две телескопические системы: 10-кратная из кварцевого стекла КУ-1 для области 360...550 нм и 27-кратная из стекла ТФ-4 для области 550...800 нм с соответствующими просветляющими покрытиями. Смена активных сред может осуществляться как заменой кювет, так и путем промывки гидросистемы и заполнения ее новым раствором красителя.

Перестраиваемый лазер ЛЖИ-504, работающий с накачкой от лазера на парах меди, выполнен по однокаскадной схеме, так как излучение медного лазера характеризуется не столь высокой импульсной мощностью, но высокими значениями средней мощности и частоты

следования импульсов. При накачке ЛЖИ-504 излучением азотного лазера средняя мощность перестраиваемого излучения в видимой области спектра составляет 10...20 мВт.

При накачке от лазера на парах меди средняя мощность перестраиваемого излучения возрастает на порядок (спектральные зависимости мощности излучения лазера ЛЖИ-504 и параметры лазеров накачки приведены в [74]).

В резонаторе ЛК предусмотрена возможность установки ЭФП с базой 5 мм для уменьшения ширины линии излучения до  $0,04 \text{ см}^{-1}$ . Эталон устанавливается между призмами телескопической системы. Этим достигается компромисс между необходимостью установки ЭФП в пучке с малой расходимостью и резко возрастающими технологическими требованиями к изготовлению эталона, если устанавливать его за телескопом.

## 5.5 ЗАРУБЕЖНЫЕ МОДЕЛИ ЛК

Рассмотрим некоторые модели в качестве примера реализации различных оптических схем ЛК и других характерных технических решений.

В 1975 г. был создан ЛК фирмы *Lambda Physik* (FL-1000). Оптическая схема этого лазера весьма проста: в резонаторе использовалась голографическая дифракционная решетка 1800 штрих/1 мм без телескопа, ширина линии излучения составляла десятые доли нанометра. Накачка ЛК осуществлялась от азотного лазера поперечным способом. С появлением более мощных источников излучения накачки, прежде всего эксимерных лазеров, фирма выпустила более совершенную модель ЛК FL-2000.

Дисперсионный резонатор был построен по классической схеме Хэнша: дифракционная решетка и ахроматизированный линзовый телескоп Галилея. При 25-кратном увеличении телескопа и использовании голографической решетки 2440 штрих/1 мм достигалась ширина линии излучения  $\delta\lambda_r \approx 10^{-2} \text{ нм}$  даже при коротких импульсах накачки ( $\tau_n = 4 \text{ нс}$  при накачке от азотного лазера).

Уменьшение ширины линии генерации еще на порядок осуществлялось введением ЭФП в резонатор. При накачке от эксимерного лазера либо лазера на АИГ применялся каскад от одного-двух усилителей, накачка которых производилась с задержкой во времени относительно накачки генератора для повышения эффективности преобразования накачки и снижения суперлюминесценции.

В моделях лазеров *Lambda Physik*: FL-2001, -2002, FL-3001, -3002 используется расширение падающего на решетку пучка на призме, грань которой имеет малый угол относительно излучения. Решетка 600 штрих/1 мм работает в автоколлимационном режиме. Такая схема привлекает не только своей простотой, но и отсутствием необходимости смены дифракционных решеток, поскольку спектральный диапазон перестройки от 320 до 970 нм перекрывается в такой схеме использованием единственной решетки.

Базовая оптическая схема ЛК была модифицирована при создании лазеров серии FL-2001, -2002. Первое усовершенствование схемы заключалось в снижении потерь в резонаторе ЛК. Действительно, при скользящем падении излучения на грань призмы потери составляют десятки процентов, резко возрастают с ростом коэффициента расширения ( $K_{\text{р}} \approx 60$ ) пучка.

Естественно желание перевести эти потери из вредных в полезные. Для этого выходное зеркало заменяется на 100 %-ое, а выходным излучением резонатора ЛК является отражённый от призмы пучок. Но при такой схеме резко возрастает широкополосный суперлюминесцентный фон в излучении ЛК. Эта проблема в лазерах FL-2001, -2002 решена простым и оригинальным способом: решетка и призма расположены друг относительно друга так, что отражённый от призмы выходной пучок излучения ЛК прежде, чем попасть на усилитель, отражается от дифракционной решётки.

Таким образом осуществляется развязка между генератором и усилителем. Синхронная перестройка углов наклона дисперсионных элементов в генераторе и фильтрующем устройстве гарантируется тем, что в качестве обоих дисперсионных элементов служит одна и та же дифракционная решётка.

В результате применения выходного спектрального фильтра и оптимальной задержки накачки усилителей уровень широкополосного фона в излучении лазеров данного типа составляет  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  от мощности и узкополосной генерации.

Лазеры FL-3001, -3002 отличаются от FL-2001, -2002 дополнительными каскадами усиления и введением конфокального ЭФП между усилителями. Долговременная стабильность длины волны излучения обеспечивается помещением основных дисперсионных элементов и ЭФП в термостатированные объемы со стабилизацией давления. Использование нелинейных кристаллов и преобразователей на эффекте ВКР в газах позволяет перестраивать излучение лазеров FL в диапазоне 300–1000 нм.

Максимальной технической простотой при достаточно высоких спектральных характеристиках излучения ( $\delta\lambda \sim 10^{-3} \dots 10^{-2}$  нм) обладает

схема ЛК со скользящим (угол более  $89^\circ$ ) падением излучения на дифракционную решетку, которая использована, в частности, в лазерах фирмы *Quantel Int.* В этой схеме число оптических элементов в резонаторе ЛК сведено до минимума, что немаловажно для производства лазеров, так как внутрирезонаторные оптические элементы ЛК являются изделиями высокой технологической сложности.

Точность обработки поверхностей оптических элементов в лазерах ведущих фирм достигает  $\lambda_r/100$ , а поверхности внутрирезонаторных эталонов обрабатывают вплоть до  $\lambda_r/200$  при световом диаметре 1 см.

Почему же схема со «скользящим» падением не вытеснила другие, более сложные схемы резонатора в промышленных ЛК? Прежде всего, по-видимому, из-за низкой дифракционной эффективности решёток при большом угле падения излучения, приводящей к высоким потерям в резонаторе и, как следствие, к низкой ( $\eta \sim 1...5\%$ ) эффективности и ограниченному диапазону длин волн генерации каждого красителя.

Для того чтобы уменьшить суперлюминесцентный фон в излучении ЛК, фирма *Quantel Int.* использует в своём лазере *Datachrom-5000* схему резонатора, в которой излучения генерации и суперлюминесценции выходят из активной среды под углом друг к другу.

## **5.6 ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ЛАЗЕРЫ С АКУСТООПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ**

подавляющее большинство коммерческих ЛК построены на основе классических дисперсионных оптических элементов — призмы, дифракционных решёток. Переход от нарезных дифракционных решёток к голографическим повышает спектральную избирательность резонатора, но не меняет традиционного для спектральных приборов оптомеханического способа управления длиной волны излучения.

В перестраиваемых лазерах задача обеспечения точности настройки и стабильности волны излучения ещё более трудна, чем в обычной спектральной аппаратуре, из-за многопроходowego сужения ширины линии генерации. Это обстоятельство дополнительно повышает требования к прецизионным механическим узлам и электроприводам управления дисперсионными элементами (требуется секундные точности поворота и контроля положения механизмов перестройки).

Поэтому особый интерес представляют поиски методов управления длиной волны излучения ДК с априорной (программируемой) перестройкой без использования прецизионной механики. Таким методом является акустооптическое управление [192].

В режиме сканирования длины волны спектральные приборы с акустооптическим управлением не имеют, вообще говоря, принципиальных преимуществ в быстродействии по сравнению с традиционными дифракционными приборами. Однако акустооптические устройства дают уникальную возможность программируемого переключения длины волны по всему рабочему диапазону за время между импульсами излучения. Это существенно расширяет алгоритмические возможности применения ЛК при создании спектрально-аналитической аппаратуры.

Действительно, сканирование спектра излучения применяется в основном в спектроскопических исследованиях, в то время как в большинстве рутинных аналитических измерений требуется настройка лазера и монохроматора на известные заданные длины волн.

Быстрое и точное переключение длины волны лазерного излучения вместо сканирования существенно сокращает время спектральных измерений. Это особенно важно при анализе динамических процессов, сопровождающихся количественными изменениями анализируемых веществ либо изменениями состава вещества, например при флуоресцентном и КАРС-анализе процессов горения, контроле плазмохимических и фотохимических процессов и т. п.

При заданном времени анализа быстрая дискретная перестройка спектрального прибора позволяет повысить время накопления сигналов на каждой длине волны. В результате оптические сигналы лучше выделяются на фоне шумов. Определенный интерес представляет возможность генерации одновременно нескольких длин волн излучения при подаче нескольких управляющих частот на акустооптический элемент, расположенный в резонаторе ЛК.

В качестве элемента управления длиной волны излучения ЛК может применяться как акустооптический фильтр, так и акустооптический дефлектор в сочетании с дифракционной решёткой [16]. В первом случае ширина линии генерации ЛК достигает порядка 0,1 нм, во втором — может быть существенно меньше (определяется дисперсионными свойствами решётки).

Однако число разрешаемых значений длины волны излучения при использовании акустооптических элементов составляет, как правило, не более  $10^3$ .

Поэтому при создании ЛК с акустооптическим управлением приходится делать выбор: либо «электронная» перестройка длины волны во всём диапазоне генерации красителей, но при сравнительно низких спектральных характеристиках (0,1 нм), либо генерация узкополосного излучения с перестройкой в ограниченном (пропорционально уменьшению) диапазоне длин волн.



В качестве примера рассмотрим лазер СП-70. Основными функциональными элементами дисперсионного резонатора в данном лазере являются акустооптический дефлектор и голографический селектор. Грубая перестройка длины волны излучения ЛК производится механическим поворотом селектора на дискретные углы вокруг оси, перпендикулярной плоскости угловой дисперсии. Поворот осуществляется с помощью шагового электропривода. Сканирование либо кодирование длины волны излучения в пределах 12 нм осуществляется акустооптическим дефлектором, который управляет углом падения луча на голографический селектор.

При этом воспроизводимость настройки длины волны излучения составляет  $2 \cdot 10^{-3}$  нм при ширине линии генерации  $5 \cdot 10^{-3}$  нм. Для управления акустооптическим дефлектором лазера СП-70 необходим высокочастотный генератор с выходной мощностью 1 Вт, полосой рабочих частот 50...150 МГц и относительной стабильностью частоты  $10^{-5}$ .

Первым «коммерческим» отечественным перестраиваемым лазером с акустооптическим управлением является лазер ЛЖИ-506 [54].

В состав перестраиваемого лазера входят: импульсный лазер на АИГ ЛТИ-403 с преобразованием частоты излучения во вторую гармонику, перестраиваемый излучатель на растворах органических красителей ИЗ-61 и перестраиваемый преобразователь частоты на нелинейных кристаллах.

Излучение второй гармоники лазера на АИГ ( $\lambda = 532$  нм) используется для накачки перестраиваемого излучателя ИЗ-61 на красителях. В ЛК применяется трехканальная кювета, через каждый канал которой прокачиваются различные растворы красителей, суммарный диапазон генерации которых составляет 550...680 нм. Прокачка растворов осуществляется с помощью герметичного трехсекционного вихревого насоса. Переключение диапазонов генерации ЛК производится вертикальным перемещением трехканальной кюветы с помощью электропривода, при этом микропроцессорная система управлением лазером обеспечивает автоматический выбор и переключение генерирующих сред в зависимости от заданного диапазона перестройки ЛК.

Помимо акустооптического управления длиной волны излучения лазер ЛЖИ-506 имеет ряд других особенностей. Генерация и усиление перестраиваемого излучения осуществляются в одной и той же кювете с раствором красителя при квазипродольном способе накачки. Выведенное из резонатора излучение ЛК возвращается в кювету для усиления под углом к оптической оси резонатора, навстречу этому лучу под малым углом вводится излучение накачки. Перед тем как попасть в кювету с красителем для усиления, пучок излучения ЛК расширяется — это сделано для того, чтобы согласовать диаметры пучков генерации и накачки.

В качестве дисперсионного элемента в резонаторе излучателя ИЗ-61 использован акустооптический фильтр из кристаллического кварца длиной 8 см с коллинеарным взаимодействием световых и акустических волн. Полоса пропускания такого фильтра на полувысоте составляет в видимом диапазоне спектра 0,5 нм, что обеспечивает ширину линии генерации ЛК около 0,15 нм. Роль скрещенных поляризаторов выполняют скошенные грани кристалла АОФ, на которых пучки с разной поляризацией преломляются так, что угол между ними составляет около 40°.

Для получения перестраиваемого излучения в УФ-области спектра в лазере ЛЖИ-506 использовано нелинейно-оптическое преобразование частоты видимого излучения ЛК в кристаллах КДР методом генерации второй гармоники и суммарной частоты. Угловое положение нелинейных кристаллов изменяется программно-управляемым шаговым электроприводом синхронно с перестройкой длины волны излучения ЛК.

Управление длиной волны в лазере ЛЖИ-506 осуществляется с помощью специализированных блоков: сканирующего синтезатора частоты ССЧ-1 и генератора напряжения ГН-45-65. Синтезатор формирует непрерывный сигнал амплитудой 0,7...1 В (на нагрузке 50 Ом), частоты которого изменяется по заданной программе в диапазоне 40...100 МГц с дискретностью 1 кГц. Данный диапазон управляющих частот АОФ соответствует перестройке длины волны генерации ЛК 370...800 нм (в ЛЖИ-506 используется более узкий диапазон 550...680 нм). Дискретность 1 кГц обеспечивает шаг перестройки длины волны на порядок меньше ширины линии излучения.

Генератор напряжения ГН-45-65 усиливает выходной ВЧ-сигнал синтезатора до необходимой мощности 15...20 Вт в диапазоне частот 45...56 МГц, осуществляет амплитудно-импульсную модуляцию с длительностью импульсов ВЧ-сигнала 300 мкс синхронно с импульсами генерации лазера накачки. Средняя мощность управляющего сигнала, рассеиваемая в акустооптическом фильтре, не превышает 0,5 Вт.

Для программного управления длиной волны излучения ЛК в видимом и УФ-диапазоне спектра необходимо исключить влияние температурных изменений окружающей среды на перестроечные зависимости акустооптического фильтра и нелинейных кристаллов. Для этого в лазере ЛЖИ-506 используются малогабаритные термостаты, выполненные в виде печатных плат размером 60x35x14 мм, которые устанавливаются непосредственно на держателях термостатируемых кристаллов. Оперативный контроль каждого импульса излучения основной частоты и второй гармоники лазера на АИГ, а также перестраиваемого излучения видимого и УФ-диапазонов производится двумя двухканальными индикаторами энергии ИЭ-6 с комплектом фотоприемников на основе кремниевых фотодиодов со светофильтрами.